

溶胶-凝胶法制备 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 混合微球腔的 激发高阶回音壁模式

柯超珍, 许灿华, 黄衍堂, 马靖*

福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108

摘要 采用电极火花放电法和溶胶-凝胶法制备了直径均为 $206\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 微球腔和 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 混合微球腔, 测得它们在 $1550\ \text{nm}$ 处的品质因子分别为 2.15×10^7 和 1.36×10^6 。宽带谐振透射谱显示, 与相同尺寸的 SiO_2 微球腔相比, 混合腔中高阶回音壁模式的谐振峰吸收深度比增大, 有效激发了高阶模式; 另外, 谐振波长平均红移了 $0.706\ \text{nm}$, 对应的自由光谱范围减小了 $0.020\ \text{nm}$, 表明 TiO_2 薄膜能有效调节 SiO_2 微球腔的谐振特性。直径为 $134\ \mu\text{m}$ 的微球腔的谐振波长平均红移量和自由光谱范围平均减小量分别为 $1.012\ \text{nm}$ 和 $0.022\ \text{nm}$, 表明小尺寸微球腔具有更强的谐振调节能力。

关键词 光谱学; 高阶回音壁模式; 溶胶-凝胶法; 混合微球腔; 谐振调节; TiO_2 薄膜

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0213002

High-Order Whispering Gallery Modes in $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ Hybrid Microsphere Cavity Prepared with Sol-Gel Method

Ke Chaozhen, Xu Canhua, Huang Yantang, Ma Jing*

College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract The SiO_2 microsphere cavity and the $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ hybrid microsphere cavity with diameters of $206\ \mu\text{m}$ are prepared with the electrode spark discharge method and the sol-gel method. The Q values of two microsphere cavities at $1550\ \text{nm}$ are 2.15×10^7 and 1.36×10^6 , respectively. The broadband resonant transmission spectra show that compared with those in the same size of SiO_2 microsphere cavity, the absorption depth ratios of the resonant peaks of the high-order whispering gallery modes in the hybrid microsphere cavity increase obviously, indicating that the high-order modes are effectively excited. Moreover, the average red shift of the resonant wavelengths is $0.706\ \text{nm}$ and the corresponding free spectral range is reduced by $0.020\ \text{nm}$, indicating that the resonant characteristics of the SiO_2 microsphere cavity can be effectively tailored by the TiO_2 film. The average red shift of resonant wavelength and the average reduction of free spectral range of the microsphere cavity with a diameter of $134\ \mu\text{m}$ are $1.012\ \text{nm}$ and $0.022\ \text{nm}$, respectively, indicating that small size microsphere cavities have strong resonance-tailoring capability.

Key words spectroscopy; high-order whispering gallery mode; sol-gel method; hybrid microsphere cavity; resonance-tailoring; TiO_2 film

OCIS codes 300.6170; 310.6860; 190.4400; 220.2740

1 引言

回音壁模式(WGM)光学微腔能将满足谐振腔边界条件的光场模式限制在微腔中, 其共振频率与腔的形状、折射率、尺寸等密切相关^[1]。通过大量的研究发现, 这种具有高光能量密度和特定光场分布

的微腔可以用来研究光与物质之间的强相互作用, 其应用可覆盖低阈值激光^[1-2]、高灵敏度传感^[1,3]、非线性光学^[4-5]、光学频率梳的产生^[6]等领域。其中, 可见光波段的光频梳在微型化光学原子钟^[7]、生物传感^[8]等方面具有非常重要的应用。 SiO_2 微球腔具有超高品质因子 Q 值、容易制备、可内部掺杂和

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-10-16; 录用日期: 2018-11-11

* E-mail: majing@fzu.edu.cn

表面涂覆等独特的性质^[5,9-10],常被应用于光频梳的产生。产生可见光梳的关键是色散补偿,有效的反常材料色散可与微球腔基模的正常波导色散相互补偿,产生低相位噪声的宽带光梳^[11]。SiO₂材料在波长小于1.3 μm的波段为正常色散,且波长越短,反常色散值越大,导致很难在可见光区域实现色散补偿^[12]。2011年,Savchenkov等^[13]指出,球状微腔的高阶WGM是反常色散,能够与正常材料色散相互补偿,并能成功实现794 nm的可见光克尔梳。

微腔的高阶模色散在可见光谱区域是反常的,其零色散波长可以调节到可见光区域^[14],这对于可见光波段光频梳的产生具有潜在价值。1999年,Duchiron等^[15]在蓝宝石盘腔中插入金属螺钉,并将其作为模式选择器,有效地选择性激发了6阶、7阶等阶模式;2011年,Savchenkov等^[13]利用棱镜耦合抽运晶体CaF₂腔来产生高阶模式;2012年,Ding等^[16]利用聚焦离子束(FIB)高精细地在微瓶腔表面刻蚀不同的微沟槽,通过减少腔内共振次数来精确控制高阶模的产生;2015年,Lu等^[17]通过调节锥光纤与聚合物微瓶腔的耦合位置来选择性地激发不同的高阶WGM。

在一般的SiO₂微球腔中,激发高阶模是很难实现的。TiO₂是一种非常重要的高折射率宽带隙半导体氧化物,在可见光和近红外波段具有良好的透光性,被广泛应用于抗反射涂层、干涉滤波片和薄膜光波导等^[18-19]。溶胶-凝胶法作为低温或温和条件下合成无机化合物的重要方法,具有操作简单、可混合均匀、易于掺杂、成本低等优点,在制备薄膜、复合材料等方面占有显著地位^[20]。为了实现WGM微球腔的谐振调节,并激发高阶模式,本文采用溶胶-凝胶法在SiO₂微球腔表面镀一层TiO₂薄膜,形成TiO₂-SiO₂混合微球腔,并实现有效激发红外通信波段的高阶模式(本文没有研究可见光波段的高阶模式,原因是目前实验条件有限,尚存在困难,以后将会深入研究可见光波段的高阶模式产生)。通过测量混合腔的Q值和宽带谐振吸收光谱,研究高折射率TiO₂薄膜对谐振波长、自由光谱范围(FSR)等谐振特性的调节作用以及对高阶模式的激发作用。

2 实 验

2.1 微球腔的制备

采用溶胶-凝胶法制备TiO₂-SiO₂混合光学微腔的工艺流程可分为3个步骤^[20-21]:

1) 利用电极火花放电法熔融光纤末端,制备带有光纤柄的SiO₂微球腔。取一段标准SMF28型单模光纤拉制成柄长度为5~7 cm的单锥光纤,利用光纤熔接机的电极放电时瞬时产生的巨大热能熔融单锥光纤的尖端部分,熔融的SiO₂材料在其表面张力作用下自然成球。在此过程中,可将单锥光纤放置于三维(3D)调整架上,以便调节位置,采用电荷耦合器件(CCD)显微镜实时观察微球的形成状况。烧制完成后,利用光学显微镜测量微球腔的直径(约为206 μm)。通过调节放电的持续时间、强度和次数,可以获得不同尺寸的SiO₂微球。

2) 配制TiO₂溶胶-凝胶胶体溶液。试剂包括钛酸丁酯(化学纯)、无水乙醇(分析纯)、乙醇(分析纯,质量分数为95%)、冰醋酸(化学纯)。首先将17 mL钛酸丁酯加入盛有40.0 mL无水乙醇的分液漏斗中,采用玻璃棒轻微搅拌,使两种溶液充分混合得到溶液A;然后另取10.0 mL冰醋酸和42.5 mL质量分数为95%的乙醇,同样搅拌、混匀得到溶液B;最后用滴定管将溶液A逐滴滴加到溶液B中,滴加过程中将磁力搅拌振子放入溶液B中,并在室温条件下利用磁力搅拌器迅速搅拌。值得注意的是,在滴加过程中,确保溶液B始终保持澄清。滴加完毕后,在室温下继续搅拌3.5 h。静置、老化12 h后形成胶体。

3) 利用凝胶法对烧制的SiO₂微球表面进行镀膜。将已准备好的洁净的SiO₂微球浸泡在步骤2)中配制的TiO₂溶胶-凝胶胶体中3~5 min,然后将SiO₂微球放入160 ℃的烤箱中烘烤10~15 min;取出后放置在光学显微镜下观察镀膜后的微球表面是否洁净光滑,然后利用电极放电设备对混合微球进行放电。再次放电烧制是为了使镀膜层和基质层融合得更致密,从而使混合微球腔的表面更光滑。如果需要测量单个循环的薄膜厚度,可以使用洁净的SiO₂玻璃片作为基质完成镀膜过程,该镀膜过程与实验样品微球的镀膜过程相同,然后使用探针式台阶仪测定玻璃片上的镀膜厚度,进而可以测得微球表面的镀膜厚度。通常,单次镀膜厚度约为50~200 nm。

2.2 微球腔谐振透射光谱与Q值测试

微球腔谐振光谱测试实验装置示意图如图1所示。为了高效地耦合微球腔,本实验利用锥形光纤耦合器来实现宽带光源耦合进入微球腔。实验中,用拉锥机拉制锥腰直径为1.5~2.0 μm、长度约为3 cm的锥光纤,并将其粘附、固定在一个U形框边

缘。将微球竖直固定在一个 3D 纳米精细调整台上,U 形框水平固定在另一个微调架上,同时调节两个微调架,使锥光纤的锥腰与微球的赤道面相切。采用一个连接到计算机的 CCD 显微镜实时观测锥光纤与微球腔的耦合情况。微球腔的透射光谱测量原理如下:利用一个自发辐射(ASE)宽带光源输出光谱范围为 1520~1620 nm 的宽带光源,该

光源经一个偏振控制器调节偏振态后输入到锥光纤中,利用锥光纤产生倏逝波电磁场,将光波耦合进入微球中。当输入波长与微球腔的某个 WGM 发生谐振时,会在透射光谱中形成明显的吸收峰。该宽带的谐振信号通过锥光纤另一端输入光谱分析仪(O SA,测量光谱范围为 600~1700 nm,测量精度为 0.002 nm)中进行测量。

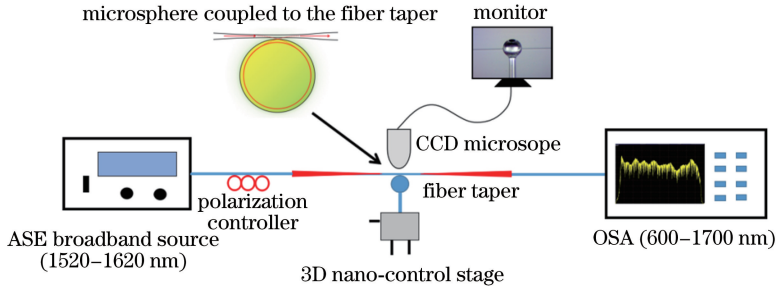


图 1 微球腔谐振光谱测试的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring resonant spectrum of microsphere cavity

WGM 谐振腔模的消光比通常依赖于锥-腔的耦合关系。微腔与锥光纤耦合关系通常用欠耦合、恰耦合和过耦合来表示,且通过精确调节锥-球间隙来实现。恰耦合表现为光子外部寿命等于固有腔的衰减时间,输入光可以全部耦合进微腔,意味着谐振腔模的消光比达到最大^[5]。本实验中通过调节锥-球间距到恰耦合状态,使得测得的 Q 值近似表示本征品质因子 Q_0 ,保证在测量微球腔谐振光谱特性时始终保持 WGM 谐振腔模的消光比最大。

为了测试所制备的 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 混合光学微球腔的 Q 值,利用函数信号发生器调制的可调谐单频激光器结合示波器采集微球腔的谐振信号。函数信号发生器发出的三角波调制信号分为两路:一路连接到可调谐激光器,用于调制激光器中的压电陶瓷,从而调节激光频率;另一路连接到示波器,用于检测谐振信号。经过三角波信号调谐的激光通过偏振控制器调节偏振后,通过锥腰直径为 $1.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 的锥光纤耦合进入待测微球腔发生谐振,谐振透射光进入光电探测器后变成电信号,然后输入到示波器中进行显示。本实验中使用的函数信号发生器的型号为 FG-506(台湾茂迪股份有限公司生产);可调谐激光器型号为 Photonetics 3642HE15(上海光航电子科技有限公司生产),波长范围为 $1460\ \text{nm}\sim 1600\ \text{nm}$,最大输出光功率为 $6.5\ \text{mW}$,可调谐精度为 $0.001\ \text{nm}$,压电陶瓷的调谐率为 $300\ \text{MHz/V}$; InGaAs 探测器的型号为 DET10C/M(美国 Thorlabs 公司生产),探测波长范围为 $1457\sim$

$1599\ \text{nm}$,灵敏度为 $-30\ \text{dBm}$,带宽为 $35\ \text{MHz}$;示波器的型号为 TDS 974D(美国 Tektronix 公司生产),4 个通道,带宽为 $2\ \text{GHz}$ 。可调谐激光器的抽运频率与腔模处于谐振时,可以看到类似图 2 所示的谐振吸收谱线,其中:黑色实线为经探测器传输到示波器的电压信号,代表锥光纤的传输光强信号;蓝色实线为函数信号发生器发出的三角波调制信号,调制电压峰的峰值为 $2\ \text{V}$,调制频率为 $300\ \text{Hz}$ 。在一个周期内,激光频率经历线性增大和减小两个过程,抽运电压先增大后减小,扫描波长随之来回扫描,两次经过谐振,在示波器上显示谐振峰相对锯齿波的峰值位置近似呈对称分布(图 2 所示测试图中的绿色虚线表示其中一个对称中心,绿色箭头表示对称谐振峰对)。通过测量吸收谱线谐振峰半峰全宽(FWHM)对应的时间,可以计算得到微球腔的 Q 值^[5],即

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{c/\lambda_0}{\frac{t_{\text{FWHM}}}{0.5T_{\text{signal}}} m U_{\text{signal}}}, \quad (1)$$

式中: f 为谐振频率; Δf 为谐振峰线宽; c 为光速; λ_0 为谐振波长; t_{FWHM} 为谐振峰 FWHM 对应的时间; $m = 300\ \text{MHz/V}$ 为可调谐激光器中压电陶瓷的调谐率; U_{signal} 和 T_{signal} 分别为信号发生器输出的三角波电压峰的峰值和信号周期。利用该方法可以准确测得本实验所用直径 $2R$ 均为 $206\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 微球以及 $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ 混合光学微腔在 $1550\ \text{nm}$ 处的 Q 值分别为 2.15×10^7 和 1.36×10^6 。

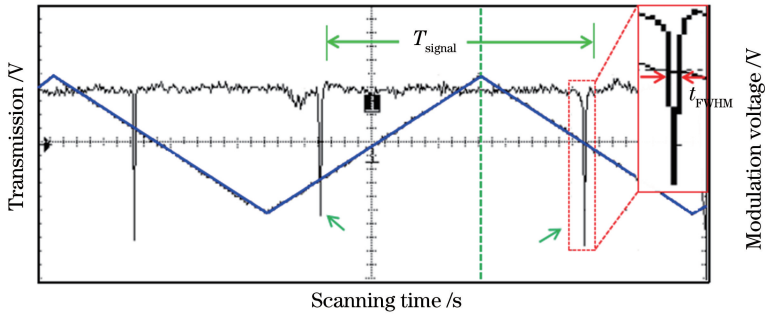


图 2 SiO₂ 微球腔的 Q 值测试图

Fig. 2 Q value test chart of SiO₂ microsphere cavity

3 结果与分析

图 3 所示为实验测试直径为 206 μm 的 SiO₂ 微球腔 WGM 的部分谐振光谱图,其中每个透射吸收峰对应微球腔的一个 WGM。由图 3 可知,微球具有周期性 WGM 分布,且不同的模式对应不同的吸收峰位置和吸收深度。其中基模的吸收深度非常大(图 3 中星号标注),计算其中 1 个基模($\lambda_0 = 1526.880$ nm)与相邻 2 个角向模式之间的 FSR 分别为 2.454 nm 和 2.466 nm(不确定度主要来自于读数误差±0.002 nm)。测试中 1526.880 nm 谐振波长前、后 FSR 值的变化是由波长域上的不均匀造成的。根据 FSR 理论公式 $\lambda_{FSR} = \lambda_0^2 / (2\pi n_{eff} R_{eff})$ ^[22] (n_{eff} 为有效折射率, R_{eff} 为微腔有效半径),计算该微球腔在 1526.880 nm 处的 FSR 理论值为 2.494 nm。在实际测量球直径时可能存在测量误差,且实验用的单模光纤实际上不是纯石英材料,因此实验值和理论值存在偏差。为了估算该谐振模式的 Q 值,将图 3 中的 1526.880 nm 谐振峰进行放大,如图 3 的插图所示,其中 Q_f 为基模的品质因子, Q_h 为高阶模的品质因子。根据 $Q = \lambda_0 / \Delta\lambda$ ^[5] (其中 $\Delta\lambda$ 为谐振线宽)以及所测谐振峰的线宽,可以估算出该谐振

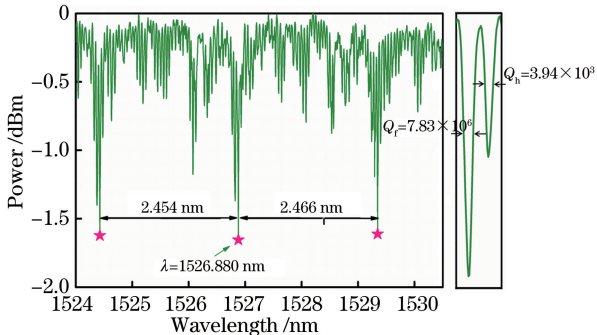


图 3 直径为 206 μm 的 SiO₂ 微球腔的 WGM 谐振光谱

Fig. 3 WGM resonant spectrum of SiO₂ microsphere cavity with diameter of 206 μm

波长的 Q 值约为 7.83×10^6 。该方法估算的 Q 值与上述扫频法测量的 Q 值基本吻合。光耦合进入 SiO₂ 微球腔时,基模 Q 值最大,最容易被激发出来。由图 3 可知,除基模之外的高阶模式的吸收深度很小,以致于难以准确识别及估算其有效 Q 值,这导致 SiO₂ 微球腔中的高阶模式难以被激发。

图 4 所示为实验测得的直径为 206 μm 的 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔 WGM 的部分谐振光谱图。由图 4 可知,该混合微球腔具有良好的透射谱特性和周期性。估测与图 3 中的 SiO₂ 微球腔对应同一个基模(此时 $\lambda_0 = 1527.768$ nm)的 Q 值为 5.69×10^5 ,这说明该混合微球腔同样具有较高密度的能量储存特性。通过与图 3 中的 SiO₂ 微球腔进行对比可以发现,同一模式的谐振波长从 1526.880 nm 向长波移动到 1527.768 nm,且临近两个 FSR 对应减小到 2.366 nm 和 2.388 nm。理论计算相同尺寸纯 TiO₂ 微球腔在波长 1527.768 nm 处的 FSR 为 1.470 nm。通过比较发现, TiO₂-SiO₂ 混合微球腔的 FSR(2.366 nm)介于 SiO₂ 球腔的 FSR(2.454 nm)与 TiO₂ 球腔的 FSR(1.470 nm)之间,且更接近前者。利用有限元法进行仿真的结果^[14]说明,光耦合进入混合微球腔后绝大部分仍分布在内部 SiO₂ 微球中。原因是利用溶胶-凝胶法制备的 TiO₂ 膜层厚度比(TiO₂ 膜层厚度与 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔直径之比)相对于球腔来说足够小,这对于腔膜的调节具有重要意义。从图 3 中还可以看出,混合微球腔的部分高阶模式的谐振峰吸收深度明显增大,与 SiO₂ 球腔相比具有更尖锐的谐振峰和更低的透射率。通过测量基模和邻近的高阶模式族的 Q 值可知,镀膜后基模的 Q 值由镀膜前的 7.83×10^6 减小到 5.69×10^5 ,高阶模式的 Q 值由镀膜前的 3.94×10^3 增大到 4.58×10^5 ,说明有更多耦合进混合微腔内的能量分布于高阶模式。原因是高阶模式分布在更靠近球心的腔内位置,而高折射率材料的引入增大了微球腔

与周围介质(本实验中是空气)的折射率差,能够将光学模式压缩到更深的腔内位置,从而更高效地激发高阶模式^[5,23]。

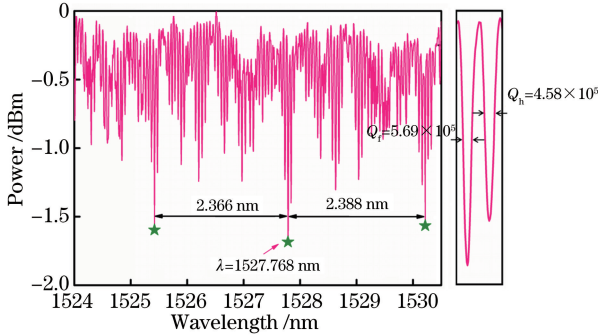


图4 直径为 206 μm 的 TiO₂-SiO₂ 混合光学微球腔的 WGM 谐振光谱

Fig. 4 WGM resonant spectrum of TiO₂-SiO₂ hybrid microsphere cavity with diameter of 206 μm

为了进一步研究混合微球腔,记录 SiO₂ 微球腔和 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔在 1520~1620 nm 宽带光谱的基模 FSR,并线性拟合其变化趋势,结果如图 5 所示。由图 5 可知,两个球腔的 FSR 均随谐振波长线性增大。在微球腔中,由于边界条件(n_1/n_2 , 其中 n_1 为空气折射率, n_2 为微球介质折射率)对不同波长的光子具有不同的限制作用,短波长的光被限制在靠近腔-空气界面传播,经历较大的光学路径,对应的 FSR 值较小^[24]。原因是微球腔自身的结构决定了 FSR 值随谐振波长 λ_0 的增大而线性增大。波导色散越大,FSR- λ_0 直线斜率越大。对图 5 进行放大观察(如图 5 的插图所示)可以发现,混合微球腔对应的谐振模式(绿色圆点)总是在 SiO₂ 微球腔(红色方格子)的左上方。即在 SiO₂ 微球腔表面镀一层高折射率的 TiO₂,可使整个微球腔的尺寸和有效折射率略增大,从而导致基模的谐振总是向长波方向移动,且对应的 FSR 相应减小。谐振波长平均红移量 $\delta\lambda$ 和平均 FSR 减小量 d_{FSR} 分别为 0.706 nm 和 0.020 nm。以上现象说明,通过在 SiO₂ 微球腔表面镀一层高折射率的 TiO₂,可以有效调节微球腔的谐振波长和 FSR。

图 6 所示为测量另一组直径均为 134 μm 的 SiO₂ 微球腔和 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔的宽带光谱基模谐振特性。由图 6 可知,对于这一组微球腔, TiO₂-SiO₂ 混合微球腔对应的谐振波长的平均红移量 $\delta\lambda = 1.012$ nm, FSR 减小量 $d_{\text{FSR}} = 0.022$ nm,进一步证明了微球腔谐振波长和 FSR 的可调节性。此外,微球腔的尺寸越小, d_{FSR} 数值越大。即小尺寸

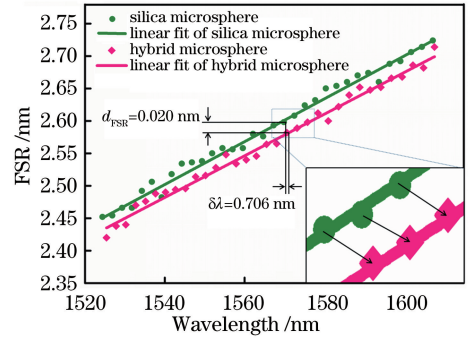


图5 直径均为 206 μm 的 SiO₂ 微球腔和 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔的宽带光谱基模谐振特性

Fig. 5 Broadband spectral mode resonant characteristics of SiO₂ and TiO₂-SiO₂ microsphere cavities with diameters of 206 μm

的微球腔具有更大的谐振调节能力。这是完全合理的,因为在小尺寸微球腔中, TiO₂ 膜层的厚度比更大。

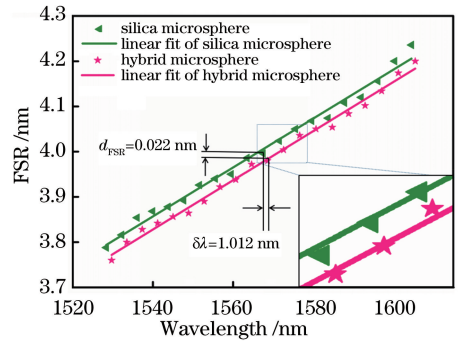


图6 直径均为 134 μm 的 SiO₂ 微球腔和 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔的宽带光谱基模谐振特性

Fig. 6 Broadband spectral mode resonant characteristics of SiO₂ and TiO₂-SiO₂ microsphere cavities with diameters of 134 μm

4 结 论

利用电极火花放电法结合溶胶-凝胶法制备了 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔。溶胶-凝胶法工艺简单,混合均匀,易于掺杂,成本较低,所制备的 TiO₂-SiO₂ 混合球腔具有较大的 Q 值、良好的谐振吸收性和周期性、较高密度的能量储存等特性。通过测试其宽带光谱的谐振透射谱并与 SiO₂ 球腔进行对比后发现,混合球腔中高阶模式的谐振峰的吸收深度比明显增大。通过测量基模和邻近的高阶模式族的 Q 值可以看出,镀膜后基模的 Q 值减小了,高阶模式的 Q 值大幅增大,说明在 SiO₂ 微球腔表面镀一层高折射率的 TiO₂ 能有效地激发出了高阶模式。同时,混合腔的 WGM 谐振波长较 SiO₂ 微球腔平均

红移了 0.706 nm, 对应的 FSR 相应减小了 0.020 nm, 表明 TiO₂ 薄膜能够有效调节 SiO₂ 微球腔膜的谐振特性。直径为 134 μm 的微球腔谐振波长的平均红移量和自由光谱范围的平均减小量分别为 1.012 nm 和 0.022 nm, 表明小尺寸的微球腔具有更强的调节能力。该 TiO₂-SiO₂ 混合微球腔有望在研究非线性现象及其应用, 如参量振荡、拉曼频移、超光激光, 尤其是可见光波段光频梳的产生等方面, 具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

[1] Zou C L, Dong C H, Cui J M, *et al.* Whispering gallery mode optical microresonators: fundamentals and applications [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, 42 (11): 1155-1175.
邹长铃, 董春华, 崔金明, 等. 回音壁模式光学微腔: 基础与应用[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(11): 1155-1175.

[2] Lü X M, Huang Y Z, Zou L X, *et al.* Unidirectional-emission circular microcavity laser with radius of 5 μm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0901010.
吕晓萌, 黄永箴, 邹灵秀, 等. 半径 5 μm 的定向输出圆盘形微腔激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0901010.

[3] Liu B B, Zhang M, Wu G Z. Mode properties and sensing technology of silica capillary ellipsoid-microbubble [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45 (11): 1128002.
刘彬斌, 张蒙, 吴根柱. 石英毛细管椭球微气泡模式特性及传感技术 [J]. *光子学报*, 2016, 45 (11): 1128002.

[4] Gui L, Zuo J C, Wu Z L, *et al.* A steady model of silicon based microring including nonlinear optical effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (4): 0419001.
桂林, 左健存, 吴中林, 等. 一种包含非线性光学效应的硅基微环稳态模型 [J]. *光学学报*, 2018, 38 (4): 0419001.

[5] Guo C L. Research on nonlinear optics and its applications in whispering gallery mode microresonators [D]. Xiamen: Xiamen University, 2016.
郭长磊. 回音壁模微腔中非线性光学及其应用的研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2016.

[6] Xiong Z T, Ruan J, Li R Y, *et al.* Soliton formation with controllable frequency line spacing using dual pumps in a microresonator [J]. *Chinese Optics*

Letters, 2016, 14(12): 121903.

[7] Meng F, Cao S Y, Zhao G Z, *et al.* Application of an Er³⁺ doped fiber comb for Sr lattice clock [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0702012.
孟飞, 曹士英, 赵光贞, 等. 掺铒光纤光梳在锶晶格钟中的应用研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42 (7): 0702012

[8] Swanson E A, Huang D, Lin C P, *et al.* High-speed optical coherence domain reflectometry [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(2): 151-153.

[9] Yan Y Z, Ji Z, Wang B H, *et al.* Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37 (7): 1789-1793.
严英占, 吉喆, 王宝花, 等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式 [J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1789-1793.

[10] Shen X Q, Beltran R C, Diep V M, *et al.* Low-threshold parametric oscillation in organically modified microcavities [J]. *Science Advances*, 2018, 4(1): eaao4507.

[11] Wang Y W, Zhang M M, Xia L, *et al.* Progress in dispersion control of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060001.
王元武, 张敏明, 夏历, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060001.

[12] Savchenkov A A, Rubiola E, Matsko A B, *et al.* Phase noise of whispering gallery photonic hyperparametric microwave oscillators [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4130-4144.

[13] Savchenkov A A, Matsko A B, Liang W, *et al.* Kerr combs with selectable central frequency [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(5): 293-296.

[14] Guo X, Zou C L, Jung H, *et al.* Efficient generation of a near-visible frequency comb via Cherenkov-like radiation from a Kerr microcomb [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 014012.

[15] Duchiron G, Cros D, Guillon P, *et al.* Mode selection for a whispering gallery mode resonator [J]. *Electronics Letters*, 1999, 32(7): 44-46.

[16] Ding M, SenthilM G, Brambilla G, *et al.* Whispering gallery mode selection in optical bottle microresonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(8): 081108.

[17] Lu Q J, Wu X, Liu L Y, *et al.* Mode-selective lasing in high-Q polymer micro bottle resonators [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22740-22745.

[18] Tong K, Dang P, Wang M T, *et al.* Enhancement of sensitivity of photonic crystal fiber surface plasmon

- resonance biosensor using TiO_2 film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0610002.
- 童凯, 党鹏, 汪梅婷, 等. 采用 TiO_2 薄膜增强光子晶体光纤表面等离子体共振生物传感器灵敏度的建模分析[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0610002.
- [19] Jia Q Y, Le Y Q, Tang Y X, *et al.* Broadband and scratch-resistant antireflective coating composed of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ prepared from sol-gel processing[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 65-69.
- 贾巧英, 乐月琴, 唐永兴, 等. 溶胶-凝胶法制备耐磨宽带 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 增透膜[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 65-69.
- [20] Zhang Q H, Zhou L, Yang W, *et al.* Sol-gel preparation of a silica antireflective coating with enhanced hydrophobicity and optical stability in vacuum[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 071601.
- [21] Ding Y, Fan H B, Zhang X, *et al.* Ultralow-threshold neodymium-doped microsphere lasers on a silicon chip[J]. Optics Communications, 2017, 395: 51-54.
- [22] Li M. Study on the optical properties of high-Q whispering-gallery-mode micro-bubble resonators [D]. Shanghai: Fudan University, 2014.
- 李明. 高 Q 回音壁模式微泡光学谐振腔的光学特性研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [23] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, *et al.* Packaged silica microsphere-taper coupling system for robust thermal sensing application [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 5753-5759.
- [24] Hagness S C, Rafizadeh D, Ho S T, *et al.* FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(11): 2154-2165.